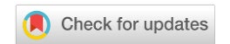
ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ
CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY

УДК 669.1:66.04
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-54-61

Оригинальное эмпирическое исследование

Формирование эпюры остаточных напряжений после закалки в магнитном поле



EDN: AKVGXS

В.Н. Пустовойт, **Ю.В. Долгачев**

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ yuridol@mail.ru

Аннотация

Введение. После закалки в изделии имеются остаточные напряжения: структурные и тепловые. Величина суммарных напряжений в готовой детали определяет её трещиностойкость под действием эксплуатационных нагрузок. Закалка в постоянном магнитном поле оказывает влияние на процесс зарождения мартенсита, кинетику мартенситного превращения, а также процессы распада мартенсита. В настоящее время отсутствуют данные о том, как указанные изменения в структуре влияют на эпюру напряжений в термически обработанном изделии. Цель работы — исследование влияния постоянного магнитного поля при закалке железоуглеродистых сплавов на распределение напряжений по сечению деталей.

Материалы и методы. Исследования проводили на образцах технического железа, стали 45 и ферритного ковкого чугуна. Применялись цилиндрические образцы диаметром 16 мм и кольцевые образцы с наружным диаметром 20 и 55 мм. Образцы нагревали в электропечи или индукционным нагревом токами высокой частоты от лампового генератора ЛЗ-13. Закалку проводили в воде или минеральном масле. Постоянное магнитное поле напряжённостью от 768 до 1600 кА/м при закалке создавалось в зазоре электромагнита ФЛ-1. Определение остаточных напряжений осуществлялось по оригинальной методике В.А. Блиновского, основанной на измерении деформации изгиба в полых телах вращения.

Результаты исследования. Получено изменение температуры на поверхности, в сердцевине и перепад температур по сечению цилиндрического образца при охлаждении в воде без поля и в магнитном поле. Изучено распределение напряжений по сечению после закалки в поле и без поля технического железа в спокойной воде. Исследовано распределение напряжений по сечению после закалки в поле и без поля в спокойной воде, а также при спреерном охлаждении с различной скоростью стали 45 и ферритного ковкого чугуна.

Обсуждение и заключение. Полученные расчетные и экспериментальные данные позволили оценить возможные изменения под действием магнитного поля эпюр остаточных напряжений после завалки с объемным и поверхностным нагревом. Исследование кинетики охлаждения в воде под действием магнитного поля показало, что перепад температуры по сечению оставался практически неизменным, но наблюдалось снижение охлаждающей способности воды, что способствовало снижению уровня тепловых напряжений. Закалка в магнитном поле способствовала снижению остаточных напряжений в железоуглеродистых сплавах. Изменение распределения суммарных остаточных напряжений при магнитном отпуске обусловлено изменением их структурной составляющей. Магнитное поле оказывает влияние на распределение структурных, тепловых и суммарных остаточных напряжений. Причиной наблюдаемых эффектов является изменение под действием магнитного поля структурного состояния стали и чугуна и охлаждающей способности закалочных жидкостей на водной основе. Снижение уровня остаточных напряжений при термической обработке в магнитном поле уменьшает вероятность хрупкого разрушения и трещинообразования, приводит к снижению деформаций и коробления закаленных сталей, создает благоприятные условия для работы деталей в условиях знакопеременных нагрузок и абразивного трения.

Ключевые слова: закалка, сталь, чугун, остаточные напряжения, магнитное поле, структурные напряжения, тепловые напряжения

Благодарности. Авторы благодарят редакцию журнала за ценные замечания и сотрудников кафедры «Материаловедение и технологии металлов» ДГТУ: заведующего кафедрой М.С. Егорова, профессора Ю.М. Домбровского и доцента С.А. Гришина за помощь в получении и обсуждении результатов

Для цитирования. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В. Формирование эпюры остаточных напряжений после закалки в магнитном поле. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(4):54–61. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-54-61

Original Empirical Research

Formation of Residual Stress Diagram after Quenching in a Magnetic Field

Viktor N. Pustovoit, Yuri V. Dolgachev
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia
yuridol@mail.ru

Abstract

Introduction. After hardening, a product has residual stresses: structural and thermal. The magnitude of the total stresses in the finished part determines its crack resistance under the influence of operational loads. Quenching in a constant magnetic field affects the process of martensite nucleation, and the kinetics of martensite transformation, as well as the processes of martensite decomposition. However, there is currently no data available on how these changes in structure affect the stress diagram in a heat-treated product. The aim of this study was to investigate the influence of a constant magnetic field during hardening of iron-carbon alloys on the stress distribution across the cross-sectional area of parts.

Materials and Methods. The studies were conducted on samples of technical iron, steel 45, and ferritic malleable cast iron. Cylindrical samples with a diameter of 16 mm and ring samples with an outer diameter of 20 and 55 mm were used. The samples were heated in an electric furnace or an induction heating lamp generator LZ-13, and quenched in water or mineral oil. A constant magnetic field with strength of 768 to 1600 kA/m during hardening was created in the bore of a FL-1 electromagnet. Residual stresses were determined using the original method developed by V.A. Blinovskii based on measuring bending deformations in hollow bodies of revolution.

Results. The change in temperature on the surface, in the core, and the temperature difference across the cross-section of a cylindrical sample during cooling in water with and without a magnetic field was obtained. The distribution of stresses over the cross-section after quenching with and without a field for industrial iron in still water was studied. The stress distribution over the cross-section was studied after quenching in a field and without a field in calm water, as well as during spray cooling of steel 45 and ferritic ductile cast iron at different rates.

Discussion and Conclusion. The obtained calculated and experimental data allowed us to evaluate possible changes in the residual stress diagrams under the influence of a magnetic field after quenching with volumetric and surface heating. A study of the kinetics of cooling in water under the influence of a magnetic field showed that the temperature difference across the cross-section remained practically unchanged, but there was a decrease in the cooling capacity of the water, which contributed to a reduction in the level of thermal stress. Hardening in a magnetic field led to a reduction of residual stresses in iron-carbon alloys. The change in the distribution of total residual stresses during magnetic tempering was due to a change in their structural component. The magnetic field influenced the distribution of structural, thermal and total residual stresses. The reason for the observed effects was the change in the structural state of steel and cast iron and the cooling ability of water-based quenching liquids under the influence of a magnetic field. The reduction of the level of residual stresses during heat treatment in a magnetic field reduced the likelihood of brittle fracture and cracking, led to a decrease in deformation and warping of hardened steels, and created favorable conditions for the operation of parts under conditions of alternating loads and abrasive friction.

Keywords: hardening, steel, cast iron, residual stresses, magnetic field, structural stresses, thermal stresses

Acknowledgements. The authors would like to express their gratitude to the Editorial team of the Journal for their valuable comments and to the staff of the Department of Materials Science and Technology of Metals at Don State Technical University, particularly Head of the Department M.S. Egorov, Professor Yu.M. Dombrovsky and Associate Professor S.A. Grishin, for their assistance in obtaining and reviewing the results.

For citation. Pustovoit VN, Dolgachev YuV. Formation of Residual Stress Diagram after Quenching in a Magnetic Field. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(4):54–61. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-54-61

Введение. Имеющиеся после закалки остаточные напряжения принято разделять на структурные [1, 2] и тепловые [3, 4]. Тепловые напряжения возникают из-за одновременного влияния двух факторов: изменения удельного объёма металла с температурой и наличия градиента температур в изделии подвергающемся термической обработке. Напряжения структурного характера обусловлены дилатационными эффектами от фазовых переходов, особенно при протекании фазовых превращений неоднородно по объёму детали. Таким образом результирующие напряжения в обрабатываемом изделии формируются сложением напряжений структурного и теплового характера. Известно [5, 6], что главным фактором, определяющим величину значений напряжений после закалки, оказывается момент смены знака тепловых напряжений относительно момента возникновения напряжений структурного характера. Появление структурных напряжений после смены знака тепловых напряжений приводит к увеличению результирующих напряжений в изделии. Соответственно возникновение структурных напряжений до изменения знака тепловых напряжений понижает суммарные напряжения. Величина суммарных напряжений в готовой детали определяет надежность машиностроительной продукции в процессе эксплуатации [7, 8]. Влияние постоянного магнитного поля в процессе закалки сталей и чугунов проявляется в процессе зарождения мартенсита, изменении кинетики мартенситного превращения, а также в изменении отпускных процессов, протекающих непосредственно при закалочном охлаждении. В настоящее время неизвестно, как влияние магнитного поля может сказаться на эпюре остаточных напряжений в термически обработанном изделии. Цель работы — исследование влияния постоянного магнитного поля при закалке железоуглеродистых сплавов на распределение напряжений по сечению деталей.

Материалы и методы. В настоящей работе проводили исследования на образцах технического железа, стали 45 и ферритного ковкого чугуна. Применялись цилиндрические образцы диаметром 16 мм и кольцевые образцы с наружным диаметром 20 и 55 мм. Образцы нагревали в электропечи или индукционным нагревом токами высокой частоты от лампового генератора ЛЗ-13. Закалку проводили в воде или минеральном масле. Постоянное магнитное поле напряжённостью от 768 до 1600 кА/м при закалке создавалось в зазоре электромагнита ФЛ-1.

Определение остаточных напряжений осуществлялось по оригинальной методике, созданной В.А. Блиновским [9]. Методика основана на измерении деформации изгиба в полых телах вращения. Она предусматривала вырез из образца кольцевого сектора и измерение возникающих при этом изменений диаметра. Получаемая деформационная кривая служила исходной информацией для расчёта остаточных напряжений с помощью ЭВМ.

Результаты исследования и их обсуждение. При закалке стали температурный градиент, приводящий к неоднородным изменениям удельного объёма по сечению детали, оказывает влияние на формирование эпюры остаточных напряжений. При большом перепаде температур между поверхностью и сердцевиной в момент прохождения мартенситного превращения (например, при сквозной закалке с охлаждением водой после нагрева в печи) на поверхности сплошного цилиндра возникают сжимающие тангенциальные и осевые напряжения. Наоборот, закалка в масле, когда мала разница температур между сердцевиной и поверхностью в момент прохождения мартенситного превращения, приводит к возникновению на поверхности растягивающих напряжений. При этом формирование эпюры напряжений происходит в следующей последовательности. Быстрое охлаждение на поверхности приводит к уменьшению объёма, однако внутри сохраняется высокая температура, что противодействует уменьшению объёма и приводит к возникновению растягивающих напряжений наружного слоя. При этом до температур $T_{упр}$(~500–550 °С) возможна пластическая деформация наружных слоев. При дальнейшем охлаждении пластичность снижается, возрастает σ_T и остается возможность только для упругих деформаций, что приводит к росту растягивающих напряжений. Их рост продолжается до момента охлаждения внутренних слоёв, что смещает максимумы растягивающих напряжений к центру и несколько снижает поверхностные растягивающие напряжения. При достаточной глубине прогрева (практически более 2 мм) сокращение в объёме центральных слоёв приводит не только к полному устранению начальных растягивающих напряжений, но и к появлению на поверхности сжимающих напряжений, сохраняющихся после окончания охлаждения.

Когда поверхностные слои охлаждаются до точки $M_н$, то процесс закалочного превращения приводит к увеличение объёма. При этом внутренние слои, не испытывающие закалки, препятствуют этому увеличению, что формирует во внутренних слоях напряжения растяжения, а в поверхностном — сжатия. С перемещением фронта закалки от поверхности сжимающие напряжения уменьшаются, а их максимум сдвигается к центру. В результате после закалки напряжения на поверхности могут иметь различный знак (хотя могут остаться неизменными). Величина сжимающих напряжений в поверхностном слое растёт с уменьшением глубины закаленного слоя.

На рис. 1 приведены результаты исследования кинетики охлаждения в воде образца диаметром 16 мм из армко-железа. Как видно, в условиях действия магнитного поля перепад температуры по сечению образцов остается практически неизменным, однако временная зависимость Δt смещается в сторону больших длительностей охлаждения. Это происходит в результате снижения охлаждающей способности воды в магнитном поле [10, 11] и способствует

более интенсивной релаксации напряжений путем пластической деформации, в результате чего наблюдается снижение уровня тепловых напряжений (рис. 2). Следовательно, магнитное поле, действующее при закалке, влияет на формирование как структурной, так и тепловой составляющей остаточных напряжений.

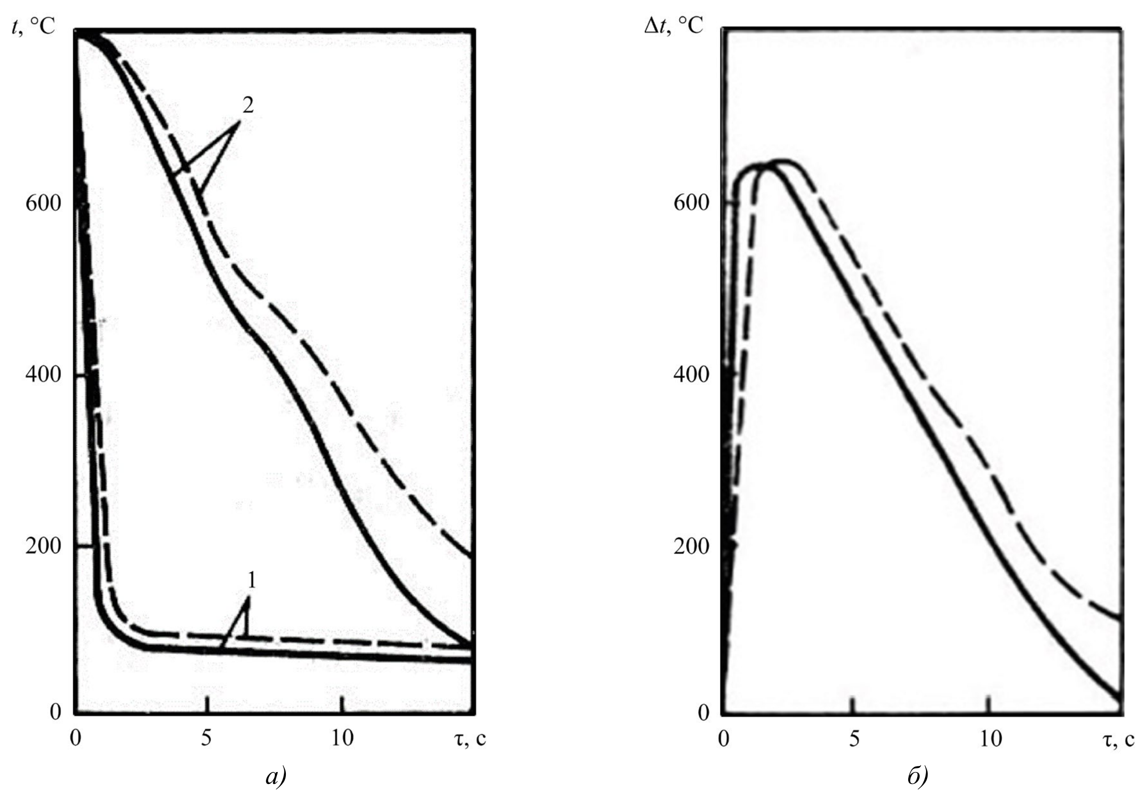


Рис. 1. Температурные изменения в цилиндрическом образце при охлаждении в воде:
сплошная линия — без поля; штриховая линия — в магнитном поле напряженностью 1,6 МА/м;
а — на поверхности 1 и в сердцевине 2; *б* — перепад по сечению

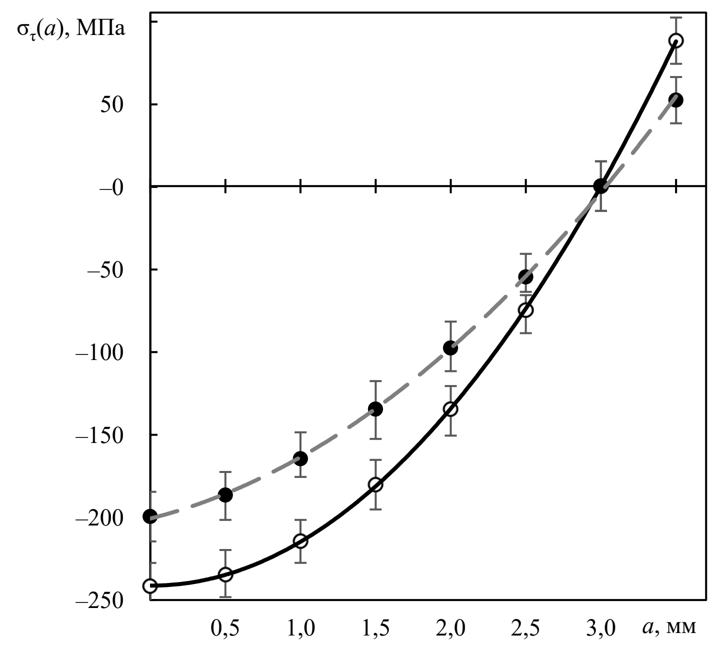
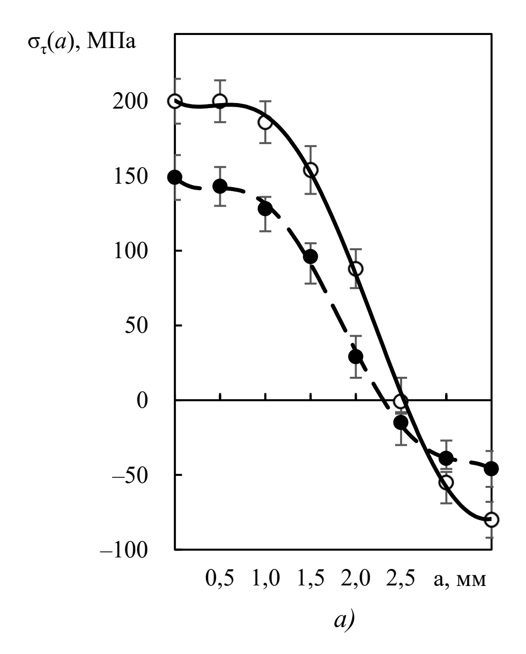


Рис. 2. Распределение напряжений по сечению после закалки технического железа от 800 °С в спокойной воде:
сплошная линия — без поля; штриховая линия — в магнитном поле напряженностью 1,4 МА/м

Для оценки влияния магнитного поля на распределение суммарных остаточных напряжений в закаленных и отпущенных сплавах были проведены эксперименты, результаты которых приведены на рис. 3. После обычной закалки кольцевых образцов с наружным диаметром 20 мм на поверхности наблюдались растягивающие напряжения. Это объясняется малым температурным перепадом между периферией и центром во время протекания мартенситного превращения, поэтому преобладающее влияние на распределение суммарных остаточных напряжений оказывает их структурная составляющая. Закалка в магнитном поле способствует снижению оста-

точных напряжений в сплавах как с отрицательным (сталь 45), так и с положительным (ковкий ферритный чугун) изменением объемного эффекта мартенситного превращения. Это указывает на то, что основная причина снижения остаточных напряжений — их интенсивная релаксация в условиях действия магнитного поля. Усиление под влиянием магнитного поля степени распада мартенсита [12] вызывает возрастание этого эффекта.



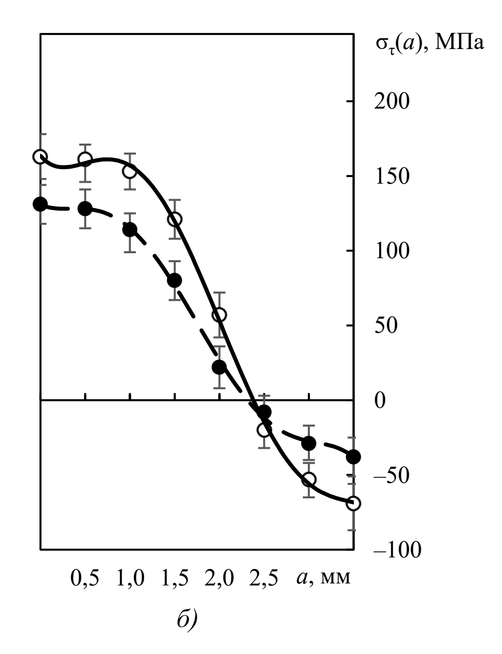
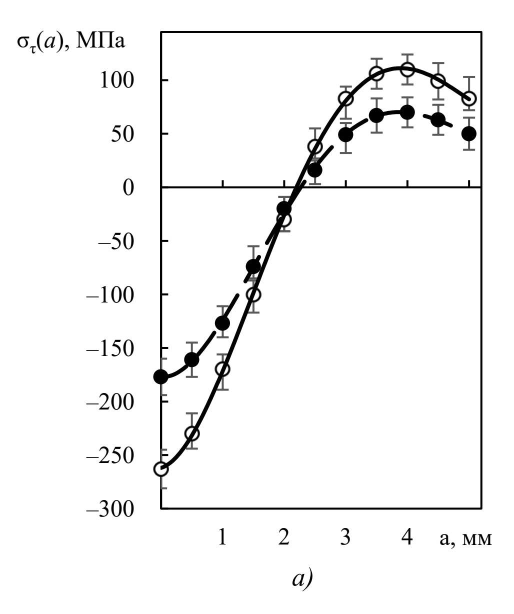


Рис. 3. Распределение напряжений по сечению после закалки от 1000 °C в спокойной воде сплошная линия — без поля; штриховая линия — в магнитном поле напряженностью 1,4 МА/м; *а* — сталь 45; *б* — ферритный ковкий чугун

Аналогичные закономерности наблюдались при спреерном охлаждении водой кольцевых образцов диаметром 55 мм (рис. 4). Отличие заключается в том, что воздействие магнитным полем вызывало снижение поверхностных сжимающих напряжений, обусловленных превалирующим влиянием на суммарную эпюру тепловой составляющей остаточных напряжений.



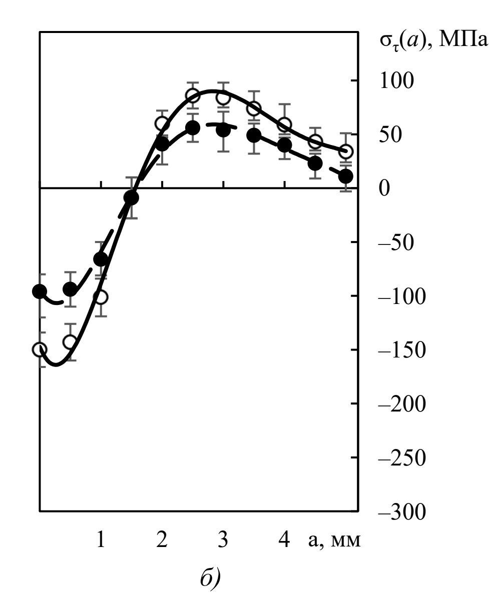


Рис. 4. Распределение напряжений после закалки от 1000 °C со спреерным охлаждением водой υ = 2 м/с: сплошная линия — без поля; штриховая линия — в магнитном поле напряженностью 768 кА/м; *а* — сталь 45; *б* — ферритный ковкий чугун

Увеличение скорости течения воды через спреер до υ = 10 м/с приводит при обычной закалке к повышению величины поверхностных сжимающих напряжений. При такой скорости течения охлаждающая способность и степень «закалочной» релаксации напряжений под действием магнитного поля изменяются незначительно. Поэтому наблюдаемые изменения обусловлены в основном структурным фактором: усилением степени распада мартенсита в стали 45 и увеличением количества мартенсита в ковком чугуне.

Таблица 1

Влияние охлаждения в магнитном поле после нагрева в печи на уровень остаточных напряжений

Параметры	Безуглеродистые сплавы		Среднеуглеродистые сплавы		Высокоуглеродистые сплавы	
	Охлаждающая среда					
	вода	масло	вода	масло	вода	масло
Напряжения на поверхности сплошного цилиндра после обычного охлаждения	сжимающие	сжимающие, но меньшие, чем при охлаждении в воде	сжимающие	растягивающие	сжимающие	растягивающие
Изменение напряжений на поверхности сплошного цилиндра после охлаждения в магнитном поле в результате: – снижения охлаждающей способности закалочных жидкостей;	уменьшение сжимающих	–	уменьшение сжимающих	–	уменьшение сжимающих	–
– увеличения количества мартенсита	–	–	–	–	увеличение сжимающих	увеличение растягивающих
– усиления процессов распада мартенсита («in statu nascendi»)	–	–	уменьшение сжимающих	уменьшение растягивающих	уменьшение сжимающих	уменьшение растягивающих

Таблица 2

Влияние охлаждения в магнитном поле после индукционного (поверхностного) нагрева на уровень остаточных напряжений

Параметры	Безуглеродистые сплавы		Среднеуглеродистые сплавы		Высокоуглеродистые сплавы	
	Глубина закаленного слоя					
	малая	большая	малая	большая	малая	большая
Напряжения на поверхности сплошного цилиндра после обычного охлаждения	растягивающие	сжимающие	сжимающие		сжимающие	
Изменение напряжений на поверхности сплошного цилиндра после охлаждения в магнитном поле в результате: – снижения охлаждающей способности закалочных жидкостей;	уменьшение растягивающих	уменьшение сжимающих	уменьшение сжимающих		уменьшение сжимающих	
– увеличения количества мартенсита;	–	–	–		увеличение сжимающих	
– усиления процессов распада мартенсита («in statu nascendi»)	–	–	уменьшение сжимающих		уменьшение сжимающих	

Обсуждение и заключение. Полученные расчетные и экспериментальные данные позволили оценить возможные изменения под действием магнитного поля эпюр остаточных напряжений после завалки с объемным (таблица 1) и поверхностным нагревом (таблица 2). Изменение распределения суммарных остаточных напряжений при магнитном отпуске обусловлено изменением их структурной составляющей.

Таким образом, магнитное поле оказывает влияние на распределение структурных (при закалке и отпуске), тепловых (при закалке) и суммарных остаточных напряжений. Причиной наблюдаемых эффектов является изменение под действием магнитного поля структурного состояния стали и чугуна и охлаждающей способности закалочных жидкостей на водной основе. Усиление явлений распада мартенсита вызывает снижение, а увеличение полноты мартенситного превращения — повышение уровня структурных напряжений. Снижение охлаждающей способности закалочных жидкостей на водной основе ведет к уменьшению остаточных напряжений в результате интенсивной релаксации путем пластической деформации. Усиление под действием магнитного поля процессов релаксации в большинстве случаев является основным фактором изменения эпюры остаточных напряжений. В свою очередь, снижение уровня остаточных напряжений при термической обработке в магнитном поле уменьшает вероятность хрупкого разрушения и трещинообразования, приводит к снижению деформаций и коробления закаленных сталей, создает благоприятные условия для работы деталей в условиях знакопеременных нагрузок и абразивного трения.

Список литературы / References

1. Samuel A, Prabhu KN. Residual Stress and Distortion during Quench Hardening of Steels: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance.* 2022;31(7):5161–5188. https://doi.org/10.1007/s11665-022-06667-x

2. Villa M, Niessen F, Somers MAJ. In Situ Investigation of the Evolution of Lattice Strain and Stresses in Austenite and Martensite During Quenching and Tempering of Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A.* 2018;49:28–40. https://doi.org/10.1007/s11661-017-4387-0

3. Ali Tabatabaeian, Ahmad Reza Ghasemi, Mahmood M. Shokrieh, Bahareh Marzbanrad, Mohammad Baraheni, Mohammad Fotouhi. Residual Stress in Engineering Materials: A Review *Advanced Engineering Materials.* 2022;24(3):2100786. https://doi.org/10.1002/adem.202100786

4. Bhadeshia HKDH, Honeycombe RWK. *Steels: Structure, Properties, and Design.* Elsevier; 2024. 550 p. URL: https://books.google.ru/books?id=U9PKEAAAQBAJ&hl=ru&lr (accessed: 20.08.2024).

5. Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М, Кузовлева О.В. *Основы формирования состояния высокой деформационной способности металлических систем.* Монография. Тула: Тульский государственный университет; 2018. 382 с.

Gvozdev AE, Zhuravlev GM, Kuzovleva OV. *Fundamentals of the Formation of State of High Deformation Capability of Metal Systems.* Monograph. Tula: Tula State University; 2018. 382 p. (In Russ.)

6. Bhadeshia HKDH, Honeycombe RWK. *Steels: Microstructure and Properties*. Butterworth-Heinemann; 2017. 488 p. URL: https://books.google.ru/books?id=4Rt5CgAAQBAJ&hl=ru (accessed: 20.08.2024).

7. Касьянов В.Е., Демченко Д.Б., Косенко Е.Е., Теплякова С.В. Метод оптимизации надежности машин с применением интегрального показателя. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2020;(1):23–31. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-1-23-31

Kasyanov VE, Demchenko DB, Kosenko EE, Teplyakova SV. Method of Machine Reliability Optimization Using Integral Indicator. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2020;(1):23–31. (In Russ.) https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-1-23-31

8. Вернези Н.Л. Коэффициент вариации предела текучести металла новых и долгое время эксплуатировавшихся строительных конструкций. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;(3):44–54. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-44-54

Vernezi NL. Variation Coefficient of Metal Yield Strength in New and Long-Used Building Structures. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;(3):44–54. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-44-54 (In Russ.)

9. Блиновский В.А. *Исследование превращений, особенностей структуры и остаточных напряжений при закалке и отпуске железоуглеродистых сплавов в магнитном поле.* Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Ростов-на-Дону: РИСХМ; 1978. 28 с.

Blinovskii VA. *Investigation of Transformations, Structural Features and Residual Stresses during Quenching and Tempering of Iron-Carbon Alloys in a Magnetic Field.* Author's abstract. Rostov-on-Don: Rostov-on-Don Institute of Agricultural Engineering; 1978. 28 p. (In Russ.)

10. Pustovoit VN. Cooling Capacity of Quenching Liquids in Magnetic Field. *Metal Science and Heat Treatment.* 1978;20(2):131–133. https://doi.org/10.1007/BF00670306

11. Youkai Wang, Huinan Wei, Zhuangwen Li. Effect of Magnetic Field on the Physical Properties of Water. *Results in Physics.* 2018;8:262–267. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.12.022

12. Pustovoit V.N., Dolgachev Yu., Dombrovskii Yu.M. Use of the Superplasticity Phenomenon of Steel for "Internal" Magnetic Correcting a Product. *Solid State Phenomena.* 2017;265:745–749. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.265.745

Об авторах:

Виктор Николаевич Пустовойт, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код, ORCID, ScopusID, ResearcherID, pustovoyt45@gmail.com

Юрий Вячиславович Долгачев, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код, ORCID, ResearcherID, ScopusID, yuridol@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

В.Н. Пустовойт: формирование основной концепции, цели и задач исследования, научное руководство, доработка текста, корректировка выводов.

Ю.В. Долгачев: получение экспериментальных данных, расчеты, анализ результатов исследований, подготовка текста, формулирование выводов.

Конфликт интересов. **Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Viktor N. Pustovoit, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Materials Science and Technologies of Metals Department, Don State Technical University, (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, ResearcherID, pustovoyt45@gmail.com

Yuri V. Dolgachev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Materials Science and Technologies of Metals Department, Don State Technical University, (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, ResearcherID, yuridol@mail.ru

Claimed Contributorship:

VN Pustovoit: formulation of the basic concept, goals and objectives of the research, academic advising, revision of the text, correction of the conclusions.

YuV Dolgachev: obtaining experimental data, calculations, analysis of the research results, preparation of the text, formulation of the conclusions.

Conflict of Interest Statement: **the authors do not have any conflict of interest.**

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 22.08.2024
Поступила после рецензирования / Revised 17.09.2024
Принята к публикации / Accepted 21.09.2024